第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612072521
杨俊,关莹莹,李雪铭,席建超.城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例.生态学报,2018,38(3):778-787.
Yang J, Guan Y Y, Li X M,Xi J C.Urban fringe area ecological vulnerability space-time evolution research: the case of Ganjingzi District, Dalian.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):778-787.

城市边缘区生态脆弱性时空演变
——以大连市甘井子区为例

杨 俊[1,2,*],关莹莹[1],李雪铭[1],席建超[2]
1 辽宁师范大学,自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室,大连 116029
2 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室,北京 100101

摘要:以 1998 年的土地利用数据和 2003、2007、2013 SPOT5 遥感数据等多元数据为基础,运用 ESC 模型结合空间分析法,线性加权方法计算社区的 EVI 值,并将甘井子区生态脆弱性划分为 5 个等级;以及运用二乘算法计算变化斜率,*F* 值测算变化显著性,将变化斜率和变化显著性分为 4 个等级,研究大连市甘井子区 1998—2013 生态脆弱性的时空分异。结果表明:(1)从城市边缘区生态脆弱性等级分布特征来看,城市边缘区生态环境呈现出相同等级聚集,以邻近沙河口区社区为中心,相邻等级呈现出明显的辐射状,东西方向差异明显的特征。(2)从社区间生态脆弱性差异的角度来看,甘井子内部各社区生态状态差异显著。邻近市区的社区生态脆弱性变化显著生态环境迅速恶化,平均 EVI 由 0.62 增加至 0.73,变化显著性指数为 2.26。远离市区的部分社区生态环境变化不大,生态环境保持良好状态。部分社区 EVI 变化值呈现负增长,生态逐渐恢复。(3)从城市边缘区生态脆弱性整体变化趋势来看,1998—2013 年间甘井子区的生态脆弱性变化与城市化发展速度密切相关,以 2007 年为节点,1998—2007 年平均变化斜率指数为 0.51,2007—2013 年平均变化斜率指数为 0.19,呈现出先快后慢的下降趋势。
关键词:ESC 模型;城市边缘区;生态脆弱性;大连市

Urban fringe area ecological vulnerability space-time evolution research: the case of Ganjingzi District, Dalian

YANG Jun[1,2,*], GUAN Yingying[1], LI Xueming[1], XI Jianchao[2]
1 *Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*
2 *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: Based on the land use data of 1998 and the remote sensing data of 2003, 2007, and 2013 SPOT5, the Ecological Vulnerability Index (EVI) value of the communities was calculated using the Exposure Susceptibility Coping Capacity (ESC) model combined with spatial analysis and linear weighting, and the ecological vulnerability of the Ganjingzi area was divided into five grades. To establish the evaluation index system, the change slope was calculated using the multiplication method. When the *F* value was significant, the change slope and significance were divided into four grades. Temporal distribution of ecological fragility in Ganjingzi District of Dalian, from 1998 to 2013, was also studied. The results were as folloes: (1) From the perspective of the distribution characteristics of ecological vulnerability in urban fringe areas, the ecological environment of the urban fringe area showed the same level of aggregation, and the neighborhood adjacent to the Shahekou District showed a distinct radial pattern, with obvious differences between the east and the west. (2) From the

基金项目:国家自然科学基金项目(41471140, 41771178); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2015058)
收稿日期:2016-12-07; **网络出版日期:**2017-10-18
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yangjun@ lnnu.edu.cn

perspective of the ecological vulnerability of the communities, the ecological status of the communities within Ganjingzi District was significantly different. The ecological vulnerability of the communities adjacent to the urban area was remarkable, and the ecological environment was rapidly deteriorating. The mean EVI increased from 0.62 to 0.73. The change index, for significant differences, was 2.26. The ecological environments of some communities distant from the urban areas did not change remarkably, and were maintained in a good condition. In some communities, changes in EVI showed negative growth and the ecological environments gradually recovered. (3) From the urban fringe ecological vulnerability of the overall trend of change, the change of ecological vulnerability in Ganjingzi District between 1998 and 2013 was closely related to the speed of urbanization. With 2007 as the node, the average change or slope index in 1998—2007 was 0.51 and that in 2007—2013 was 0.19, showing a slow down after the first slow trend.

Key Words: Exposure Susceptibility Coping Capacity (ESC); urban fringe area; ecological vulnerability; Dalian City

生态脆弱性是全球环境变化和可持续发展研究的核心问题之一[1-2]。随着全球环境变化影响研究的加强,特别是对于人地关系研究的深入,有关生态脆弱性及其脆弱性评估、脆弱生态环境的可持续性管理、已受损害的生态环境的恢复重建等研究逐渐成为全球性研究热点,其研究内容不断扩展、应用领域日趋广泛并呈现学科综合化的趋势[3-5]。

伴随着社会经济的飞速发展,城市生态问题愈加严重,城市生态脆弱性研究也成为热点问题[1]。目前国内外学者对于生态脆弱性已经开展了多项研究[6-8],研究对象多选择特殊地理地貌环境[9-13]、工矿业城市[14-16]、农业城市等[17],研究短时段内区域生态脆弱性变化。通过建立评价指标体系[10-11, 18-19]结合多种分析方法[10, 17, 20],分析城市生态脆弱性的形成机制以及变化特征[8, 21-24]。随着城市生态研究的深入,城市化快速发展的背景下城市人口、城市用地逐渐向边缘区扩展,城市边缘地区生态环境也面临着挑战[3, 16]。城市边缘地区生态问题的研究逐渐成为热门,对城市边缘地区生态环境保护研究做出综述[25-27],梳理研究方法和理论,为城市边缘地区环境保护和生态建设提供理论支持。

综上所述,目前对于城市边缘区生态脆弱性的研究,缺少以城市边缘区内部空间为基础,以地理信息系统技术为手段动态分析城市边缘区生态脆弱性差异性;以定量研究为基础,利用多年时序对快速城市化背景下的城市边缘区时空分异研究。以快速城市化的海滨城市的城市边缘区为研究对象,揭示不同时段城市生态脆弱性的特点。

城市边缘区是城市和乡村的交错结合带,是城市发展与资源环境保护之间矛盾冲突的区域。城市边缘区作为城市发展的腹地,因自身特点和城市所处的发展阶段,面临不同的生态问题。科学合理的规划城市边缘区的生态环境建设,对城市发展具有十分重要的现实意义大连作为发展较快的海滨城市,城市化发展以及城市用地的扩张,均受到半岛环境多丘陵少平原地理条件的限制,城市用地逐渐向城市边缘区扩展,出现的生态问题极具代表性。因此,本文以社区尺度为生态评价单元,选择大连市城市化发展迅速的 1998—2013 年,利用线性加权综合评价方法[28]与 ESC(Exposure Susceptibility Coping Capacity)模型框架建立评价指标体系[29],并结合变化斜率法模拟生态脆弱性的年际变化,对逐个 EVI(Ecological Vulnerability Index)与时间回归拟合计算变化斜率;F 值测算显著性[19],分析大连市甘井子区 1998—2013 年间,生态脆弱性变化显著性的空间分布特征,以及社区间生态脆弱性变化的差异。以期为快速城市化下的大连建设发展提供新的视角。

1　研究数据与方法

1.1　研究区概况

甘井子区(38°47′—39°07′N,121°16′—121°45′E)位于大连市中心城区,呈马蹄形,东北与金州区接壤,南与沙河口区为邻,西南与旅顺口区毗连,面积 502km^2,辖 14 个街道,165 个社区是大连市城乡结合区和城市扩展区(图 1)。特殊的地理区位使甘井子区的城市化生态环境脆弱性问题成为大连市全域城市化进程中生态

脆弱性问题的代表,研究具有现实意义。



图 1 研究区域位置图

Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源与处理方法

本文以 1998 年土地利用以及 2003 年、2007 年、2013 年的 SPOT5 遥感影像数据为基础,结合《大连统计年鉴》、《甘井子统计年鉴》等社会生态环境、社会经济统计等数据(表 1)。

表 1 数据来源与说明

Table 1 Data sources and description

指标 Index	数据来源 Data sources	时间 Time	数据处理 Data processing
土地利用覆盖现状 Land use cover current situation	大连市土地局	1998 2003、2007、2013	土地利用数据 SPOT5 分辨率:2.5m 遥感解译
人为活动干扰强度 Human activities interference intensity	甘井子统计年鉴	1998—2013	监测统计
人口密度 Population density	大连统计年鉴	1998—2013	人口数量/土地面积
气候条件 Climate condition	大连统计年鉴	1998—2013	统计计算
水资源条件 Water resources condition	大连统计年鉴	1998—2013	水资源总量/人口数量
地形条件 Topography condition	地理空间数据云	2014	G DEM 分辨率:30m 数字高程模型提取
社会经济发展水平 Social economic development level	甘井子统计年鉴	1998—2013	人口数量/土地面积 第二产业数量/总产业数量
环境保护和生态建设意愿及能力 Wish and ability for Environmental protection and ecological construction	甘井子统计年鉴 大连市统计年鉴	1998—2013	统计计算 处理达标量/总处理量

1.3 生态脆弱性评估方法

在借鉴前人研究成果及征询专家意见的基础上,通过 ArcGIS 数据进行处理。通过建立评价指标体系,引

入线性加权综合评价方法结合 ESC 评估框架计算 EVI,利用二乘算法分析生态脆弱性指数的变化斜率,利用 *F* 值测算显著性指数,分析甘井子区 1998—2013 年间各个社区生态脆弱性演变。技术流程图如下(图 2)。

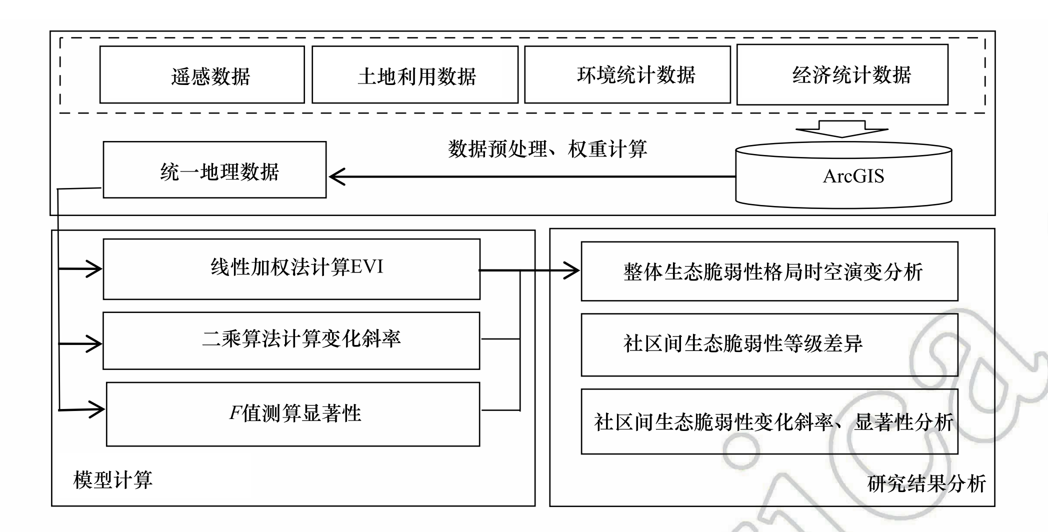


图 2　技术路线图

Fig.2　Technology road map

1.3.1　ESC 框架建立评价体系

ESC 模型将生态脆弱性分解为 3 个维度,分别是暴露度、敏感性和应对能力,其内涵和表征各有针对性[8, 30]。随着城市化的迅速发展城市生态系统中的各个要素随之变化。由于评价指标间有一定的相关性,指标信息在一定程度上有重叠,指标过多会增加分析问题的复杂性,不同的评价指标对生态脆弱性的响应强度不同,因此引入权重值的概念,利用各个评价指标的权重值进行生态脆弱性指数计算,从而使得出的结果更接近真实水平。采用软件 Yaahp Version 对表 2 的数据进行权重计算得出各个指标的权重值(表 2)。

1.3.2　数据标准化处理

各项指标数据的计量方式不统一,因此应对原始数据进行标准化处理。考虑脆弱性评价指标正负向对生态脆弱性影响不同,采取了不同的标准化处理方法。其中,运用极差标准化方法处理正负向指标,运用模糊隶属度函数的方法处理适度指标[21]。标准化公式如下:

正向指标:
$$X'_{ij}=\frac{x_{ij}-\lambda_{j\min}}{\lambda_{j\max}-\lambda_{j\min}},(i=1,2\cdots,n;j=1,2\cdots,m) \tag{1}$$

负向指标:
$$X'_{\text{ij}}=\frac{\lambda_{\max}-x_{ij}}{\lambda_{j\max}-\lambda_{j\min}},(i=1,2\cdots,n;j=1,2\cdots,m) \tag{2}$$

适度指标:
$$X'_{ij}=\begin{cases}2(X_{ij}-\lambda_{j\min})/(\lambda_{j\max}-\lambda_{j\min}) & (\lambda_{j\min}<X_{ij}<X_0)\\ 0 & (X_{ij}\geqslant\lambda_{j\max}\text{或}X_{ij}\leqslant\lambda_{j\min})\\ 2(\lambda_{j\max}-X_{ij})/(\lambda_{j\max}-\lambda_{j\min}) & (X_0-X_{ij}<\lambda_{i\max})\end{cases} \tag{3}$$

式中:X_{ij} 为脆弱性指标原始数据,$\lambda_{j\min}$ 为指标原始数据最小值,$\lambda_{j\max}$ 为指标原始数据最大值,X_0 为指标适度值,X'_{ij} 为标准化后的指标值。

1.3.3　计算生态脆弱性指数及分级

生态系统脆弱性的评估需要集成评价 ESC 框架模型中评价指标,获得综合评价指数。因此,我们采用线性加权方法计算生态脆弱性指数:

表 2　基于 ESC 评估框架的生态脆弱性评价指标体系

Table 2　Ecological vulnerability evaluation index system based on ESC model

要素层 A Factor level A	要素层权重 Feature level weight	目标层 B Target level B	目标层权重 Target level weight	指标层 C Index level C	指标性质 Index property	指标层权重 Index level weight
暴露度 A_1 Exposure A_1	0.424	人口产业分布 B_1	0.054	人口密度 C_1/(人/km^2)	+	0.054
		人为活动干扰强度 B_2	0.138	单位废水排量 C_2/m^3	+	0.046
				单位废气排放量 C_3/m^3	+	0.046
				单位固废排放量 C_4/m^3	+	0.046
		气候条件 B_3	0.120	年均降水量 C_5/mm	*	0.063
				年均≥10℃ C_6/℃	*	0.057
敏感性 A_2 Susceptibility A_2	0.247	土地利用覆盖现状 B_4	0.181	绿地覆盖率 C_7/%	+	0.070
				建筑用地所占比率 C_8/%	-	0.068
				耕地所占比率 C_9/%	-	0.043
		水资源状况 B_5	0.067	人均可利用水 C_{10}/(人/m^3)	+	0.033
				水资源资源量 C_{11}/m^3	+	0.034
		地形条件 B_6	0.084	坡度 C_{12}/°	*	0.042
				高程 C_{13}/m	*	0.042
应对能力 A_3 Coping capacity A_3	0.329	经济社会发展水平 B_7	0.162	人均 GDP C_{14}/(人/元)	+	0.062
				第二产业比重 C_{15}/%	*	0.064
		环境保护和生态建设意愿及能力 B_8	0.194	环保投资 C_{16}/万元	+	0.053
				教育投资 C_{17}/万元	+	0.048
				废水达标率 C_{18}/%	+	0.031
				废气处理达标率 C_{19}/%	+	0.031
				垃圾无害处理率 C_{20}/%	+	0.031

“+”表示指标与对应的要素层适应性呈正相关;“-”表示指标与对应的要素层适应性呈负相关;“*”表示适度指标,指标数值处于某一适度的数值时与对应要素层适应性为最好,由各年份指标标准均值计算得出适度值

$$EVI = \left(\sum_{i=1}^{n} W_i I_i\right) / \left(\sum_{i=1}^{n} W_i\right) \tag{4}$$

式中,EVI 为生态脆弱性指数;W_i 为评价指标的权重;I_i 为评价指标的具体值。

在得到 EVI 值的基础上,参照国内外已有的生态脆弱性评价研究的评价标准[8, 31],并根据研究区的具体特征,将大连市甘井子区生态脆弱性划分为 5 个等级(表 3)。

表 3　城市生态脆弱性状态评价标准

Table 3　Urban ecological vulnerability evaluation standards

城市生态脆弱程度 Urban ecological vulnerability level	等级 Level	综合生态脆弱性指数 Composite ecological vulnerability index
生态良好 Good ecology	I	EVI≤0.35
轻度脆弱 Slight vulnerability	II	0.35<EVI≤0.50
中度脆弱 Medium vulnerability	III	0.50<EVI≤0.65
强度脆弱 Intensity vulnerability	IV	0.65<EVI≤0.80
极强度脆弱 Ultimate vulnerability	V	0.80<EVI

1.3.4　生态脆弱性变化

变化斜率法是对一组随时间变化的变量进行回归分析,预测其变化的趋势。本研究利用变化斜率法模拟生态脆弱性的年际变化,即利用最小二乘法对逐个 EVI 值与时间进行回归拟合,其斜率计算公式如下:

$$X = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} \times \text{EVI}_i - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \text{EVI}_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{5}$$

式中,X 为变化斜率;n 为时间年数;EVI_i 为第 i 年的生态系统脆弱性指数值。

根据计算出的甘井子区社区 EVI 值变化斜率,参照相关研究成果并结合实际情况[19],将变化斜率分为 4 个等级,能更加直观的对社区的生态脆弱变化情况进行比较(表 4)。

表 4　变化斜率分级评价标准

Table 4　Change slope classification evaluation standard

变化斜率分级 Change slope classification	变化斜率指数 Change slope index	变化斜率分级 Change slope classification	变化斜率指数 Change slope index
I	$0 \leqslant X < 0.15$	III	$0.30 \leqslant X < 0.45$
II	$0.15 \leqslant X < 0.30$	IV	$0.45 \leqslant X < 0.60$

变化趋势显著性检验采用 F 值检验,统计量计算如下:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \tag{6}$$

式中,Q 为误差平方和;U 为回归平方和;根据 EVI 的变化趋势和显著性水平,参照相关研究结果并根据实际情况将变化趋势分为 4 类 (如表 5)。

表 5　变化显著性分级评价标准

Table 5　Change significance grading evaluation standards

变化显著性程度 Change significance level	等级 Grade	显著性指数 F Significance index
无显著性变化 No Significantly change	I	$F < 0.15$
轻度恶化 Slight deterioration	II	$0.15 < F \leqslant 0.20$
中度恶化 Medium deterioration	III	$0.20 < F \leqslant 0.25$
显著恶化 Significantly deterioration	IV	$0.25 < F \leqslant 0.30$

2　研究结果与分析

2.1　甘井子区生态脆弱性分布演变特征

通过计算社区 EVI 值和所划分的生态脆弱性等级(图 2):甘井子区社区 EVI 值空间分布呈现出东西部明显差异,相同等级小范围聚集、相近等级穿插的特征。其中,生态良好区主要分布在甘井子区西部的森林公园、主题公园和北部的高尔夫俱乐部、湿地公园。轻度脆弱区社区分布比较分散相对集中于甘井子区中部社区。极度脆弱区分布集中分布于甘井子区中部靠近沙河口区的社区。

2.2　生态脆弱性时空演变分析

2.2.1　社区间差异分析

根据前期数据积累,综合表 2 的生态脆弱性评价指标体系和城市化生态脆弱性研究方法,进行数据统计处理,得到基于城市化视角下的生态脆弱性评价标准(表 2)。并根据指标体系和评价标准将各原始标准化后输入脆弱性评价模型中进行计算,确定甘井子区各社区生态脆弱性指数及其对应的不同生态状态(图 3)。

从社区角度观察可发现,甘井子内部各社区生态状态差异显著。营城子、小平岛村等村落在 15 年间平均生态脆弱指数为 0.264,生态脆弱程度一直保持在良好的状态,在 2003—2007 年间在城市建筑用地迅速扩张,人为活动对城市生态系统严重干扰下,许多社区生态迅速恶化。前牧、对门沟等社区 EVI 值下降,EVI 值由

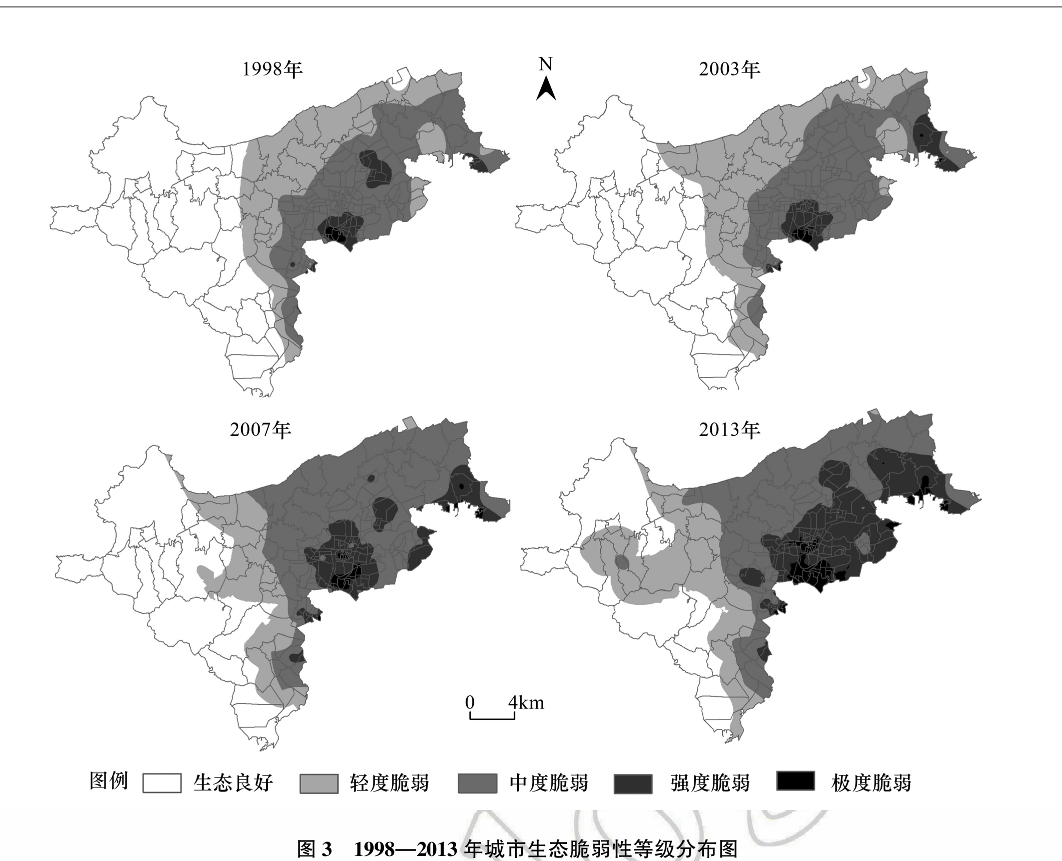


图 3 1998—2013 年城市生态脆弱性等级分布图

Fig.3 Urban ecological vulnerability grade distribution map between 1998 and 2013

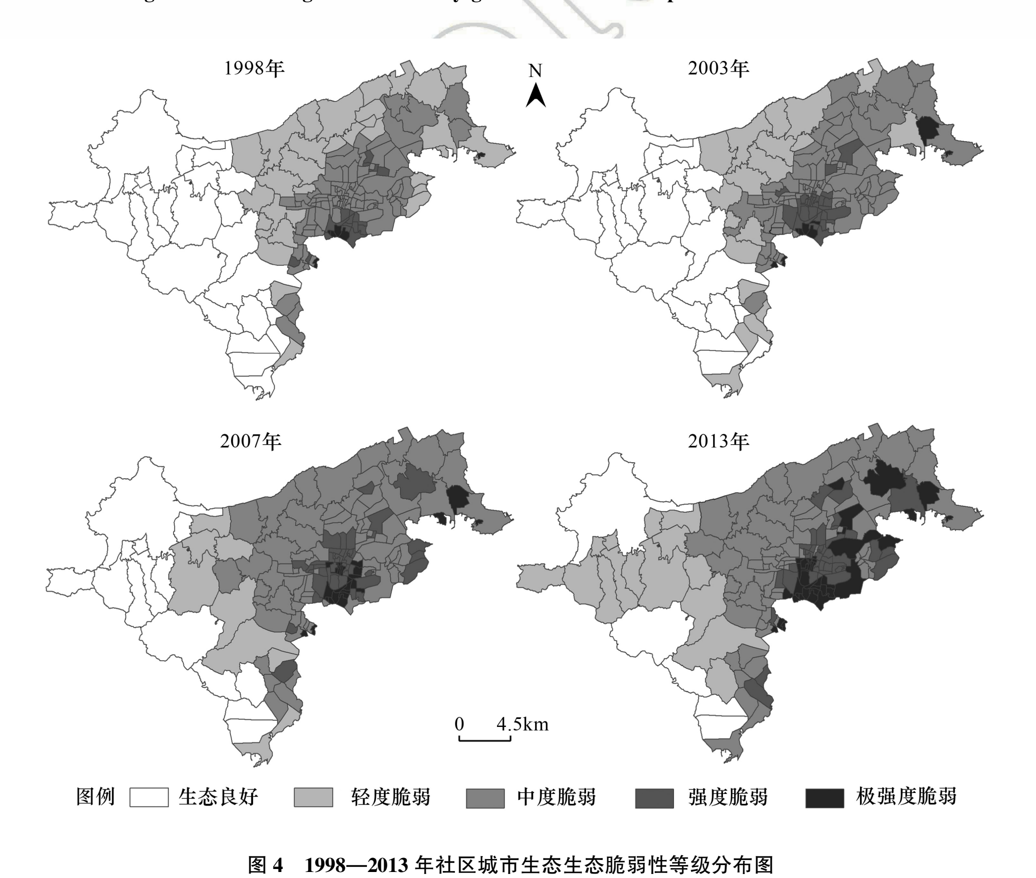


图 4 1998—2013 年社区城市生态生态脆弱性等级分布图

Fig.4 Urban ecological vulnerability discrepancy distribution map of communities between 1998 and 2013

0.293 升至 0.425,生态脆弱程度由良好逐渐变成轻度生态脆弱。在 1998—2013 年间,生态良好的社区由 27 个缩减到 5 个,轻度生态脆弱的社区由 30 缩减到 15 个,中度生态脆弱的社区由 91 个缩减到 65 个,强度生态脆弱的社区由 10 个增加到 38 个,极度脆弱的社区由 5 个增加到 40 个。变化在 1998—2007 年间较快,2007—2013 年保持相对平稳状态。

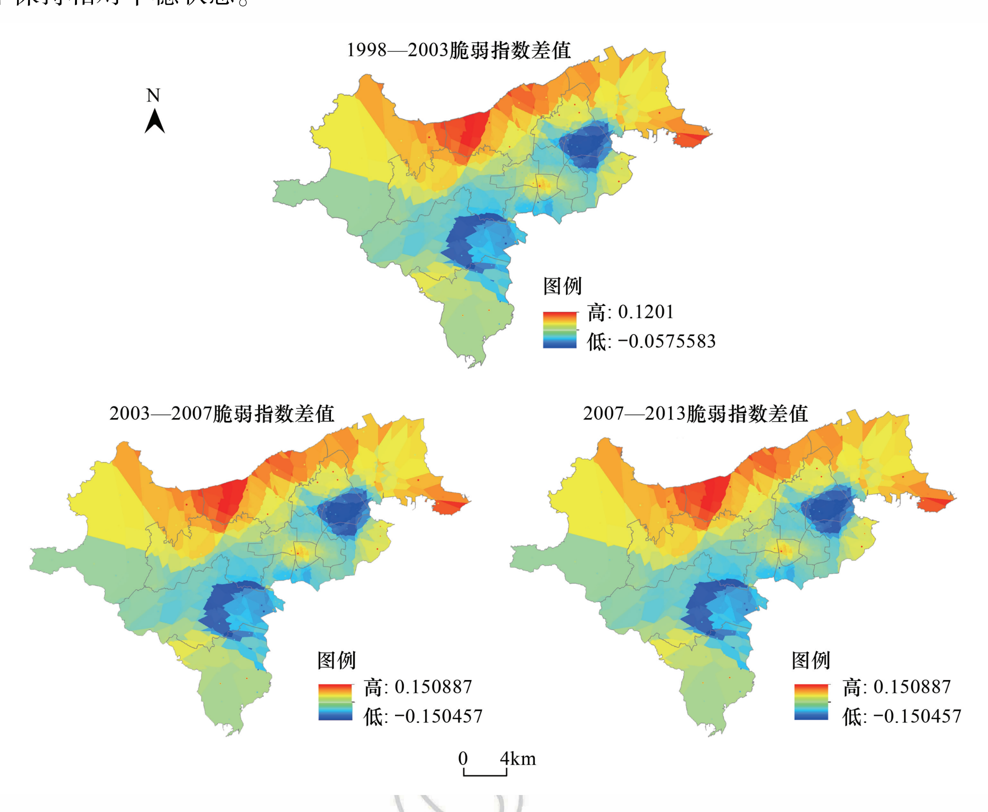


图 5　1998—2013 年甘井子区生态脆弱指数变化分布图

Fig.5　Urban ecological vulnerability index map between 1998 and 2013

15 年间甘井子区的平均生态脆弱性指数呈先快后慢的上升趋势,从 1998 年的 0.2645 到 2013 年的 0.6136,生态环境由最初的生态良好状态为主转为中度脆弱状态为主。表明甘井子区的生态脆弱性状态由城市化初期的低暴露度、低敏感性、适应能力较强,向高暴露、高敏感、适应能力较弱的状态发展,但在 2013 年时这种状况已逐渐得到缓解和控制(图 4)。

随着城市化进程的不断推进,社区间的生态脆弱情况变化也呈现出不同的特征 1998—2003 年间,中部的社区生态脆弱变化差值均维持在几乎无变化的水平,最高差值为 0.1201,部分社区生态脆弱差值保持负增长,生态环境逐渐恢复。2003—2007 年间以及 2007—2013 年间各社区生态环境变化与 1998—2003 年间相比差值的最高值上升至 0.150887,生态脆弱成都恶化较快,负增长的生态恢复的社区个数逐渐减少,范围也在逐渐缩小。

2.2.2　变化趋势分析

综合各社区各年份综合生态脆弱指数,通过变化斜率测算模型,得出了甘井子区各社区的生态脆弱变化斜率以及变化显著性标准(表 5)。

甘井子区整体 EVI 值的变化斜率如图 5,平均变化斜率为 0.0443,呈现出西部 EVI 值变化斜率主要为负值,最低值为 0.0122,生态环境逐渐恢复;东部 EVI 值的变化斜率最高值为 0.0976,生态环境迅速恶化。甘井子区生态脆弱性变化显著性特征如图 6,西北部和中心部分社区变化显著性无明显变化,西南部生态良好地区在 1998—2013 年间生态环境呈现显著变化。

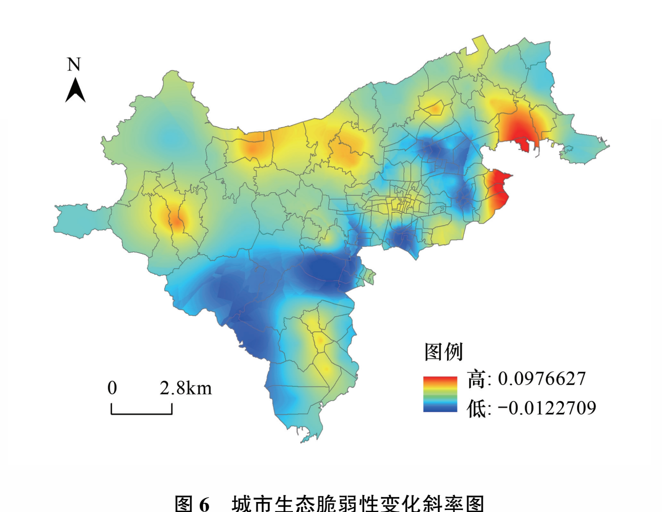


图 6 城市生态脆弱性变化斜率图

Fig.6 Urban ecological vulnerability change slope map

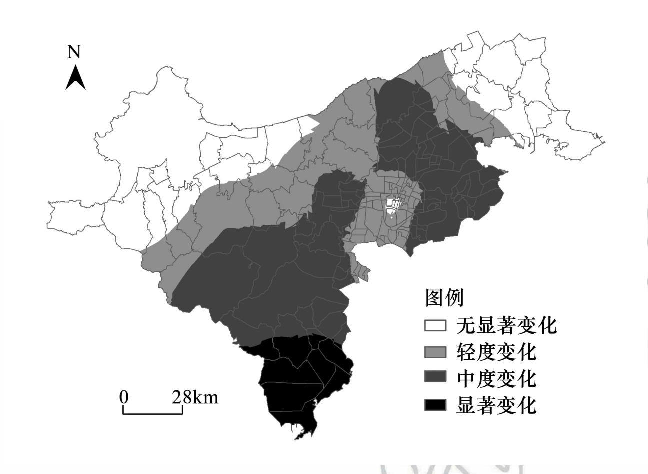


图 7 城市生态脆弱性变化显著性图

Fig.7 Urban ecological vulnerability change significantly map

3 结论与结语

3.1 结论

研究以城市生态脆弱性原理为理论基础,以大连市甘井子区为例,引入 ESC 指标体系框架结合甘井子区生态华宁变化的具体特征,结合线性加权方法计算评价社区生态脆弱性,并利用变化斜率法模拟生态脆弱性的年际变化,对逐个 EVI 值与时间进行回归拟合,计算变化斜率评价分析大连市甘井子区 1998—2013 年间的城市生态脆弱性变化,研究表明:

(1)从城市边缘区生态脆弱性等级分布特征来看,城市边缘区生态环境呈现出相同等级聚集,以靠近沙河口区的社区为中心相邻等级呈现出明显的辐射状特征。东西差异明显,西部生态维持在良好状态,东部地区与西部差异明显,主要为强度脆弱区。

(2)从社区间生态脆弱性差异的角度来看,甘井子区内部各社区生态脆弱程度差异明显。靠近市区的社区生态脆弱性变化显著,生态环境迅速恶化,远离市区的部分社区生态环境变化不大,生态环境保持良好状态。部分社区 EVI 变化值呈现负增长,生态环境逐渐恢复。

(3)从城市边缘区生态脆弱性整体变化趋势来看,1998—2013 年间甘井子区的生态脆弱性变化与城市化发展速度密切相关,呈现出先快后慢的下降趋势。城市边缘区 EVI 变化斜率值与变化显著性,体现出城市边缘区生态状况在 1998—2013 年间的变化空间特征,西南部少数社区生态环境逐渐变好,大部分社区生态恶化程度显著。

3.2 结语

本文以社区尺度,以城市化过程中城市边缘区生态脆弱性为视角,探讨城市化过程中城市边缘区生态脆弱性变化特征,以期为更好的大连建设和改善生态环境服务,但由于环保投资、教育投资等指标的数据难以获取只能采用替代数据,可能会在一定程度上对研究结果的准确性造成影响,对生态状态进行未来预测及保护和开发建议的提出是今后深入研究的课题。

参考文献(References):

[1] Jin J, Wang Q, Assessing ecological vulnerability in western China based on Time-Integrated NDVI data. Journal of Arid Land, 2016, 8(4): 533-545.

[2] 杨俊, 李雪铭, 张云, 孙才志, 徐惠民,冀保程. 基于因果网络模型的城市生态安全空间分异——以大连市为例. 生态学报, 2008, 28(6): 2774-2783.

[3] 何艳冰, 黄晓军, 翟令鑫, 闫倩, 杨新军. 西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素. 地理学报, 2016, 71(8): 1315-1328.

[4] Füssel H M, Klein R J T. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. Climatic Change, 2006, 75(3): 301-329.

[5] 徐广才, 康慕谊, 贺丽娜, 李亚飞, 陈雅如. 生态脆弱性及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(5): 2578-2588.

[6] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515-1525.

[7] 李宁, 张正涛, 郝晓琳. 社会——生态脆弱性相互关系的计量推断方法. 地理科学进展, 2016, 35(2): 214-222.

[8] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会——生态系统脆弱性评价. 地理研究, 2016, 35(2): 299-312.

[9] Pandey R, Bardsley D K. Social-ecological vulnerability to climate change in the NepaliHimalaya. Applied Geography, 2015, (64): 74-86.

[10] Mecneeley S M. A "toad's eye" view of drought: regional socio-natural vulnerability and responses in 2002 in Northwest Colorado. Regional Environmental Change, 2014, 14(4): 1451-1461.

[11] Mansur A V, Brondizio E S, Roy S, Hetrick S, Vogt N D, Newton A. An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. Sustainability Science, 2016, 11(4): 625-643.

[12] Gou B, Zhou Y, Zhu J F, Liu W L, Wang F T, Wang L T, Yan F L, Wang F, Yang G, Lou W, Jiang L. Spatial patterns of ecosystem vulnerability changes during 2001-2011 in the three-river source region of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Journal of Arid Land, 2016, 8(1): 23-35.

[13] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295.

[14] 王岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究. 地理科学, 2014, 34(5): 547-555.

[15] 顾康康, 刘景双, 王洋, 彭小黎, 王明全. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究. 地理科学, 2008, 28(6): 759-764.

[16] 祁新华, 程煜, 陈烈, 朱宇. 大城市边缘区人居环境系统演变规律——以广州市为例. 地理研究, 2008, 27(2): 421-430.

[17] Shukla R, Chakraborty A, Joshi P K. Vulnerability of agro-ecological zones in India under the earth system climate model scenarios. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015: 1-27, doi: 10.1007/s11027-015-9677-5.

[18] Krellenbrg K, Welz J. Assessing Urban Vulnerability in the Context of Flood and Heat Hazard: Pathways and Challenges for Indicator-Based Analysis. Social Indicators Research, 2016: 1-23, doi: 10.1007/s11205-016-1324-3.

[19] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 吴孔森. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟. 地理学报, 2016, 71(7): 1172-1188.

[20] Kok M, Lüdeke M, Lucas P, Sterzel T, Walther C, Janssen P, Sietz D, de Sovsa I. A new method for analysing socio-ecological patterns of vulnerability. Regional Environmental Change, 2016, 16(1): 229-243.

[21] Chouhan H A, Parthasarathy D, Pattanaik S. Urban development, environmental vulnerability and CRZ violations in India: impacts on fishing communities and sustainability implications in Mumbai coast. Environment Development and Sustainability, 2016: 1-15, doi: 10.1007/s10668-016-9779-6.

[22] 窦玥, 戴尔阜, 吴绍洪. 区域土地利用变化对生态系统脆弱性影响评估——以广州市花都区为例. 地理研究, 2012, 31(2): 311-322.

[23] Bennett N J, Kadfak A, Dearden P. Community-based scenario planning: a process for vulnerability analysis and adaptation planning to social-ecological change in coastal communities. Environment Development and Sustainability, 2015, 18(6): 1771-1799.

[24] Ordóñez C, Duinker P N. Climate change vulnerability assessment of the urban forest in three Canadian cities. Climatic Change, 2015, 131(4): 531-543.

[25] 张宁, 方琳娜, 周杰, 宋金平, 江君. 北京城市边缘区空间发展特征及驱动机制. 地理研究, 2010, 29(3): 471-480.

[26] Maina J, Kithiia J, Cinner J, Neale E, Noble S, Charles D, Watson J E M. Integrating social-ecological vulnerability assessments with climate forecasts to improve local climate adaptation planning for coral reef fisheries in Papua New Guinea. Regional Environmental Change, 2016, 16(3): 881-891.

[27] Kuentz-Simonet V, Labenne A, Rambonilaza T. Using *ClustOfVar* to Construct Quality of Life Indicators for Vulnerability Assessment Municipality Trajectories in Southwest France from 1999 to 2009. Social Indicators Research, 2016: 1-25, doi: 10.1007/s11205-016-1288-3.

[28] Zhang X, Wang Z B, Lin J. GIS Based Measurement and Regulatory Zoning of Urban Ecological Vulnerability. Sustainability, 2015, 7(8): 9924-9942.

[29] Huang J F, Wang R H, Zhang H Z. Analysis of patterns and ecological security trend of modern oasis landscapes in Xinjiang, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 134(1/3): 411-419.

[30] Fan P L, Xie Y W, Qi J G, Chen J Q, Huang H Q. Vulnerability of a coupled natural and human system in a changing environment: dynamics of Lanzhou's urban landscape. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1709-1723.

[31] 黄静, 崔胜辉, 李方一, 邱全毅, 马克明. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性. 生态学报, 2011, 31(24): 7441-7449.